



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Институт
фундаментального
образования**

**Б. А. ПРАВДИН
Е. Е. МИНЛИКАЕВА
Н. В. ЯКШИНА**

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Б. А. Правдин, Е. Е. Минликаева, Н. В. Якшина

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлению подготовки
20.03.01 — Техносферная безопасность

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2020

УДК 333.45:658.5(075.8)

ББК 30.61я73

П68

Рецензенты:

кафедра «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (завкафедрой канд. биол. наук *И. И. Гаврилин*);

исполнительный директор Научно-инженерного центра по экологической и санитарно-гигиенической оценке технологических процессов *С. В. Харитонова*

Научный редактор — д-р техн. наук, ст. науч. сотр. Е. Е. Барышев

Правдин, Б. А.

П68 Производственная безопасность оборудования и высокотемпературных технологических процессов : учеб. пособие / Б. А. Правдин, Е. Е. Минликаева, Н. В. Якшина ; Мин-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 76 с.

ISBN 978-5-7996-3124-6

В учебном пособии рассмотрены основные понятия, связанные с обеспечением производственной безопасности, такие как опасность, риск, безопасность. Разобраны принципы, методы и средства обеспечения безопасности. Приведены правовые аспекты, связанные с обеспечением производственной безопасности. Проанализированы тенденции и особенности современного производства. Приведены основные закономерности, свойственные высокотемпературным процессам. По каждой главе приводятся вопросы для самоконтроля.

Библиогр.: 5 назв. Табл. 1. Рис. 8.

УДК 333.45:658.5(075.8)

ББК 30.61я73

ISBN 978-5-7996-3124-6

© Уральский федеральный университет, 2020

Оглавление

Введение	5
1. Основные понятия в области производственной безопасности.....	6
1.1. Аксиома о потенциальной опасности любой человеческой деятельности.....	6
1.2. Понятие «риск»	10
1.3. Понятие «безопасность»	14
Контрольные вопросы.....	17
2. Система обеспечения производственной безопасности.....	18
2.1. Особенности развития современного производства	18
2.2. Концепция развития современного производства	21
2.3. Правовые аспекты производственной безопасности	21
2.4. Методы и средства обеспечения производственной безопасности.....	29
Контрольные вопросы.....	31
3. Использование высокотемпературных процессов в промышленном производстве	32
3.1. Высокотемпературные процессы в металлургии и оборудовании для их проведения ...	33

3.2. Тенденции совершенствования высокотемпературных процессов	38
Контрольные вопросы.....	40
4. Обеспечение безопасности при проведении высокотемпературных процессов.....	41
4.1. Закономерности, обусловленные высокотемпературными процессами.....	41
4.2. Процессы, проходящие в условиях высоких температур	48
4.3. Защита оборудования от теплового излучения	69
Контрольные вопросы.....	73
Список библиографических ссылок.....	74

Введение

В современном мире уровень обеспечения безопасности человека может служить наиболее достоверным и комплексным критерием оценки не только уровня экономического развития и стабильности государства, но и морально-этического состояния общества.

Это объясняется тем, что для полного и всестороннего решения сложных вопросов, связанных с научно-техническим прогрессом, требуются огромные капиталовложения и высокий уровень культуры производства, что возможно только в государстве, обладающем мощным научно-техническим и интеллектуальным потенциалом.

С другой стороны, решение данной проблемы требует активного участия всех граждан, которые должны быть готовы к ущемлению своих сегодняшних интересов, а иногда — к определенному ограничению индивидуальных свобод во имя жизни человека и развития будущих поколений. Это возможно только в обществе, которое организовано на принципах высокой нравственной культуры, с продуманной системой образования и воспитания в области безопасности жизнедеятельности.

Таким образом, уровень мышления современных специалистов, основанный на глубоком осознании главного принципа — безусловности приоритетов безопасности при решении любых инженерных задач, будь то в области научного поиска или проектно-конструкторских разработок или в области организации и управления производством, является определяющим для эффективного решения задач в сфере обеспечения производственной безопасности.

1. Основные понятия в области производственной безопасности

Производственная безопасность — это система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих или уменьшающих вероятность воздействия на работников опасных травмирующих производственных факторов, возникающих в рабочей зоне в процессе трудовой деятельности.

Для эффективности работы данной системы необходимо четкое понимание самого процесса трудовой деятельности со всеми его особенностями в условиях современного производства. Кроме того, важно умение выявлять негативные факторы, которые воздействуют на человека в процессе выполнения им трудовой деятельности.

1.1. Аксиома о потенциальной опасности любой человеческой деятельности

Активность человека, как показывает опыт, проявляется через его деятельность, которая является необходимым условием существования человеческого общества.

Деятельность — это вся совокупность видов человеческой активности, которой человек придает некий смысл, связанная с процессами жизнеобеспечения, духовного и физического со-

вершенствования. Понятие деятельности включает в себя цели, средства, результаты и сам процесс деятельности.

Модель процесса человеческой деятельности в общем виде можно представить состоящей из двух взаимосвязанных элементов: «человек — среда». Данная система имеет прямые и обратные связи (человек воздействует на окружающую среду, а среда воздействует на человека). Кроме того, данная модель является двухцелевой:

- первая цель состоит в достижении определенного эффекта (или цели деятельности);
- вторая цель заключается в исключении нежелательных последствий в процессе реализации первой цели (ущерб здоровью и жизни человека, пожары, аварии, катастрофы и т. д.).

Из данной модели следует, что любая деятельность потенциально опасна. Это утверждение носит аксиоматический характер, то есть в любой деятельности всегда существует некоторый риск. А поскольку человек живет в мире различных опасностей — природных, антропогенных, техногенных, экологических, составных, взаимодействующих между собой, — последствия такого воздействия усугубляются.

Потенциально опасный характер любой человеческой деятельности ярко иллюстрируется данными японских исследователей Хенли и Кумамото [1, с. 21]. Среднее число погибших за 10 часов в разных видах деятельности:

Сон.....	1,0
Утренний туалет и завтрак.....	2,5
Поездка на работу и домой на автомобиле.....	57,0
Дневная работа.....	3,5
Обеденный перерыв.....	2,5
Химическая промышленность.....	3,5
Строительство.....	67,0
Езда на мотоцикле.....	660,0
Развлечения.....	3,0

Аксиома о потенциальной опасности любой деятельности положена в основу научной проблемы обеспечения безопасности человека. Эта аксиома дает возможность сделать по меньшей мере два важных вывода, необходимых для формирования системы безопасности, в том числе и производственной:

1) невозможно разработать абсолютно безопасный вид деятельности человека (например, рассматривая производственную деятельность человека, невозможно создать абсолютно безопасную технику или технологический процесс);

2) ни один вид деятельности не может обеспечивать абсолютную безопасность человека, так называемый нулевой риск.

Таким образом, встает вопрос: что же такое опасность?

Опасность — это процессы, явления, предметы и различные воздействия, оказывающие нежелательное влияние на жизнь и здоровье человека.

Опасности, создаваемые деятельностью человека, имеют два важных для практики свойства:

1) потенциальный характер опасностей, который говорит о том, что опасности могут существовать, но не приносить при этом вреда;

2) ограниченная в пространстве и/или во времени зона влияния (зона действия опасности).

Источниками формирования опасностей при осуществлении конкретной деятельности являются:

- сам человек: факторы наследственности, физиологические возможности, психологические и антропометрические показатели могут стать параметрами, ограничивающими возможность человека реализовать себя в конкретной деятельности;
- процессы взаимодействия человека и производственной среды.

Человек в процессе своей деятельности формирует условия труда, то есть совокупность факторов, влияющих на него в процессе конкретной деятельности. Причем эти факторы мо-

гут негативно воздействовать на человека не только в условиях производства, но и за его пределами, например через производимую продукцию.

Негативные факторы на рабочем месте существенно отличаются от факторов природного характера. Они создаются элементами производственной среды, к которым относят: предметы, средства, продукты труда, энергию, природный климат, растения, животных и персонал.

Все виды вредных и опасных факторов, формируемых в процессе трудовой деятельности, по характеру своего происхождения делят в соответствии с ГОСТ 12.0.003–2015 [2] на следующие группы:

- факторы, порождаемые физическими свойствами и характеристиками состояния материальных объектов производственной среды (движущиеся машины и механизмы; электрический ток; повышенная температура поверхностей оборудования и обрабатываемых материалов; повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; высокие влажность и скорость движения воздуха; повышенные уровни шума и вибрации и т. д.);
- факторы, порождаемые химическими и физико-химическими свойствами используемых или находящихся в рабочей зоне веществ и материалов (пары и газы; токсичные пыли; агрессивные жидкости);
- факторы, порождаемые биологическими свойствами микроорганизмов, находящихся в биообъектах и (или) загрязняющих материальные объекты производственной среды (микроорганизмы, такие как бактерии, вирусы и т. п.);
- факторы, порождаемые поведенческими реакциями и защитными механизмами живых существ (укусы, ужаления, выброс ядовитых или иных защитных веществ и т. п.);
- факторы, порождаемые социально-экономическими и организационно-управленческими условиями осуществле-

- ния трудовой деятельности (плохая организация работ, низкая культура безопасности и т. п.);
- факторы, порождаемые психическими и физиологическими свойствами и особенностями человеческого организма и личности работающего (плохое самочувствие работника, нахождение работника в состоянии алкогольного, наркотического или токсического опьянения или абстиненции, потеря концентрации внимания работниками).

1.2. Понятие «риск»

Аксиома о потенциальной опасности любой деятельности и невозможности создания абсолютно безопасного оборудования и технологий, а также обеспечения абсолютной безопасности человека (отсутствие нулевых рисков) потребовала введения количественной оценки опасностей, которые могут нанести вред здоровью человека вплоть до летального исхода.

Существуют различные способы количественной оценки опасности, в частности численные, балльные и даже финансовые.

Численные и балльные применяются, например, для оценки интенсивности землетрясений и силы ветра. Введение финансовой оценки связано с тем, что при определении выгоды от внедрения средств по обеспечению безопасности речь в итоге идет о жизни человека, в связи с чем, в принципе, может быть дана ее финансовая оценка.

При такой постановке вопроса возникают нравственные проблемы по поводу стоимости жизни человека и недопустимости финансовых сделок вокруг нее. Но для оценки затрат на обеспечение безопасности того или иного вида деятельности, а значит, затрат для спасения человеческой жизни, такая постановка вопроса становится вполне правомерной.

Финансовая оценка опасности является для работника денежной компенсацией за реализованную опасность. В развитых странах наряду с выплатой определенной суммы пострадавшему предприятие выплачивает еще и крупную сумму за каждый несчастный случай, произошедший на производстве, в страховой фонд. Поэтому зачастую выгоднее вложить деньги в обеспечение безопасности на производстве, нежели осуществлять соответствующие выплаты.

При анализе безопасности оборудования, машин, технических систем, технологий наиболее распространенной оценкой опасности является риск.

Риск — это количественная мера опасностей, которые формируются конкретной деятельностью человека. Другими словами, опасность можно оценить через отношение числа смертельных случаев или числа случаев заболевания, вызванного действием на человека конкретного вида опасности (повышенная температура поверхностей оборудования и обрабатываемых материалов; агрессивные жидкости, низкая культура безопасности и др.) к общему количеству работников за конкретный период времени.

Значение риска конкретной опасности можно получить, зная статистику несчастных случаев за различные промежутки времени: смена, сутки, неделя, квартал, год. Годовой промежуток — наиболее распространенный.

Например, риск летального исхода для работника на производстве R можно определить следующим образом:

$$R = \frac{n}{N} = \frac{0,3 \cdot 10^4}{0,725 \cdot 10^8} = 0,4 \cdot 10^{-4},$$

где n — количество несчастных случаев с летальным исходом в России за год; N — общее число работающих в России (72,5 млн человек).

В настоящее время риск все чаще применяют для оценки воздействия негативных факторов производства. Это связано с тем,

что риск как количественную характеристику реализации опасностей можно использовать и для оценки состояния условий труда, экономического ущерба, возникшего вследствие несчастного случая или профессионального заболевания на производстве. Применять эти данные можно для формирования системы социальной политики на производстве (обеспечение компенсаций и льгот).

В производственных условиях различают различные виды риска [3, с. 12–14].

Индивидуальный риск характеризует реализацию опасности определенного вида деятельности для конкретного индивидуума. Используемые в России показатели производственного травматизма и профессиональной заболеваемости, такие как частота несчастных случаев и профессиональных заболеваний, являются выражением индивидуального производственного риска.

Коллективный риск — это ожидаемое количество погибших людей (персонала) в результате возможных аварий за определенный период времени. В соответствии с ГОСТ Р 54123–2010 «Безопасность машин и оборудования. Термины, определения и основные показатели безопасности», коллективный риск — это вероятность (частота) поражения двух и более людей в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий.

Наибольшее распространение данное понятие получило при сравнении рисков в различных отраслях производства, однако для разработки мер безопасности применение коллективного риска неэффективно, так как основной ущерб от несчастных случаев как результатов неблагоприятных событий здесь зачастую не рассматривается.

Ожидаемый (прогнозируемый) риск R — это произведение частоты реализации конкретной опасности f на произведение вероятностей нахождения человека в зоне риска при различном регламенте технологического процесса.

$$R = f \prod_i^n p_i,$$

где f — число несчастных случаев (смертельных исходов) от данной опасности чел⁻¹·год⁻¹; $\prod p_i$ — произведение вероятностей нахождения работника в но́ксосфере; p_1 — вероятность нахождения работника в цехе в течение года — отношение числа рабочих дней в году к общему числу дней в году; p_2 — вероятность работы человека на производстве в течение недели — отношение числа рабочих дней в неделе к числу дней в неделе; p_3 — вероятность выполнения работником технологического задания непосредственно на оборудовании — отношение времени выполнения задания к продолжительности рабочей смены.

Использовать данную формулу для оценки вероятности производственного риска уместно в связи тем, что при наличии информации о количестве несчастных случаев на производстве можно спрогнозировать величину возможного риска. Такой прогноз выполнить достаточно просто, так как регламент технологических процессов дает достаточно достоверные сведения о времени взаимодействия человека с производственными опасностями в течение рабочего дня, недели, года, т. е. позволяет определить вероятность нахождения работника в но́ксосфере.

Такой прогноз необходим при формировании мероприятий по улучшению условий труда на производстве, так как использование формулы позволяет определять величины рисков воздействия различных негативных факторов для конкретного технологического процесса, проводить оценку значимости каждого фактора с позиции безопасности, что и является основой для формирования мероприятий по улучшению условий труда.

Мотивированный (обоснованный) риск — это риск, который превышает приемлемый уровень и обоснован причинами, связанными с ликвидацией аварий или спасением людей и материальных ценностей, то есть возникает в случае производственных аварий, пожаров, в целях спасения людей.

Немотивированный (необоснованный) риск. Правовая неграмотность в области производственной безопасности, а иногда и нигилизм работников в отношении действующих требований безопасности технологических процессов, неиспользование ими средств индивидуальной защиты и т. п. может сформировать необоснованный риск, который, как правило, приводит к травмам и создает предпосылки аварий на производстве.

Приемлемый риск — это минимальная величина риска, которая достижима по техническим, экономическим и технологическим возможностям. Другими словами, приемлемый риск обеспечивает такой уровень смертности, травматизма или инвалидности людей, который не влияет на экономические показатели предприятия, отрасли экономики или государства в целом.

1.3. Понятие «безопасность»

Аксиома о том, что любая деятельность потенциально опасна, а также концепция приемлемого риска, основанная на понимании недостижимости абсолютной безопасности, дают возможность сформировать понятие безопасности.

Безопасность — это состояние деятельности, при котором с определенной вероятностью исключаются потенциальные опасности, влияющие на здоровье человека.

Безопасность следует понимать как комплексную систему мер по защите человека и среды обитания от опасностей, формируемых конкретной деятельностью.

Проблемы обеспечения безопасности рабочих в условиях современного производства условно можно разделить на две группы.

К первой группе относятся проблемы, которые характерны для любого объекта хозяйственной деятельности: объектов производства, собственности, налогообложения, кредитования,

страхования и т. д., другими словами — окружающей экономической среды. Ко второй группе относятся проблемы, связанные со спецификой самих технологических процессов, организации производства и расположения предприятий.

Для того чтобы обеспечить безопасность конкретной производственной деятельности, необходимо выполнить три взаимосвязанные задачи.

1. Опасности могут возникнуть в системе «человек — машина — среда». Таким образом, каждое из звеньев этой триады может стать источником опасности. Следовательно, для решения проблемы безопасности необходимо изучить все звенья этой системы, для чего осуществляется детальный анализ (идентификация) опасностей, формируемых данной деятельностью. Анализ должен проводиться в следующей последовательности: устанавливаются элементы производственной среды, являющиеся источниками опасности; проводится оценка выявленных опасностей по качественным, количественным, пространственным и временным показателям.

2. Разработка эффективных мер защиты человека и производственной среды от выявленных опасностей. Здесь необходимо понимание того, что невозможно создать абсолютно безопасные условия труда, обеспечить так называемый нулевой риск. Кроме того, существует уровень воздействия факторов, который не оказывает негативного влияния на организм человека.

Исходя из этих позиций под эффективными мерами понимаются такие меры защиты человека на производстве, которые дают наибольший эффект при минимуме материальных затрат. Данный эффект может быть выражен в снижении заболеваемости, травматизма и смертности.

3. Разработка результативных мер по защите от остаточного риска данной деятельности. Их необходимость связана с тем, что обеспечить абсолютную безопасность деятельности невозможно. Эти меры применяются в случае, когда необходимо за-

ниматься спасением человека или производственной среды. В условиях производства такую работу выполняют службы здравоохранения, противопожарной безопасности, службы ликвидации аварий и др.

Для достижения максимального эффекта в области обеспечения безопасности технологических процессов и благоприятных условий труда на производстве нужно использовать все методы и средства, включая технические, организационные, правовые и экономические.

Осуществлять мероприятия по обеспечению производственной безопасности необходимо, взяв за основу то, что человек имеет ценность не только как рабочая сила, которую нужно охранять в процессе трудовой деятельности, но и как индивидуум, который сохраняет свою непреходящую ценность независимо от местонахождения и выполняемых функций.

Исходя из этой позиции для достижения безопасности необходимо, чтобы выполнялись три условия:

- 1) общественное осознание абсолютного приоритета жизни человека;
- 2) закрепление юридического права человека в области безопасности;
- 3) экономическое регулирование взаимоотношений в области безопасности между человеком и обществом.

Основными показателями безопасности в соответствии с ГОСТ Р 54123—2010 «Безопасность машин и оборудования. Термины, определения и основные показатели безопасности» являются: риск, назначенный срок службы (год), назначенный ресурс (цикл (ч)), назначенный срок хранения (год), вероятность безотказной работы в течение назначенного ресурса по отношению к критическим отказам, коэффициент оперативной готовности (для машин и оборудования, работающего в режиме ожидания) и показатели критического воздействия (механическое, термическое, химическое, радиационное, электрическое, шум и вибрация, пожар, взрыв).

Перечисленные выше показатели безопасности нормируются законодательными или нормативно-правовыми актами федеральных органов исполнительной власти и органами государственного надзора, а также заказчиками машин и оборудования по согласованию с разработчиками.

Контрольные вопросы

1. Из чего вытекает потенциальная опасность любой человеческой деятельности?
2. Какими свойствами обладают опасности?
3. Как вредные и опасные производственные факторы классифицируются по характеру своего происхождения?
4. Какие существуют способы количественной оценки опасности?
5. Что такое риск?
6. Какие виды риска различают в производственных условиях?
7. Какие три взаимосвязанные задачи ставятся для обеспечения безопасности конкретной производственной деятельности?

2. Система обеспечения производственной безопасности

2.1. Особенности развития современного производства

Современное общество — постиндустриальное, вступившее в новый этап своего исторического развития. Его отличительными чертами являются: нарастающая роль знаний и наукоемких технологий; увеличение количества людей, работающих в информационной среде; развитие новых технологий, требующих для своего функционирования высококвалифицированных кадров; интеграция экономик и обществ во всем мире.

Перечисленные выше изменения общественной жизни наложили свой отпечаток и на особенности развития современного производства.

Одной из таких особенностей является применение на уровне предприятия, цеха, а часто и на отдельном производственном участке разнообразных технологических процессов со сложными физико-химическими реакциями, которые реализуются на высокопроизводительном оборудовании с использованием широкой номенклатуры технологических материалов.

Современному производству свойственна также быстрая смена технологий, модернизация оборудования, внедрение новых процессов и материалов, которые часто еще недостаточно изучены с точки зрения негативных последствий их применения.

Кроме того, на многих современных предприятиях используется автоматизированное, оснащенное вычислительной техникой оборудование, конвейеры, роботы и манипуляторы с программным управлением и другие современные станки и инструменты. С одной стороны, перечисленные мероприятия по обновлению производства уменьшают контакт обслуживающего персонала с возможными опасностями. С другой стороны, увеличивается потенциальная опасность возникновения профессиональных заболеваний, связанных с такими факторами трудового процесса, как интеллектуальные и эмоциональные нагрузки, их монотонность, режим работы.

Тем не менее на большинстве предприятий работа до сих пор осуществляется в условиях воздействия различных вредных и опасных факторов производственной среды, а именно: высокотоксичных и легковоспламеняющихся веществ; неионизирующих и ионизирующих излучений; повышенного уровня шума, вибрации, ультразвука и инфразвука; аномальных параметров микроклимата. Кроме этого, осуществление трудового процесса производится в условиях высокого эмоционального и умственного напряжения, а также перенапряжения анализаторов.

Еще одна особенность современного производства, осуществляющегося в условиях научно-технического прогресса, заключается в том, что вероятность каждого отдельного происшествия уменьшается, однако масштабы последствий каждого происшествия возрастают. Данную тенденцию наиболее ярко можно проследить в области самолетостроения. График на рис. 1 отражает развитие самолетостроения с точки зрения риска аварийности и числа жертв авиакатастроф [4, с. 3].

График иллюстрирует, что, с одной стороны, с развитием научно-технического прогресса вероятность аварий самолетов уменьшается, с другой стороны, число погибших увеличивается. Это связано с возросшим во много раз числом авиaperевозок, а кроме того, с увеличением числа пассажиров, которые одновременно могут находиться на борту самолета.

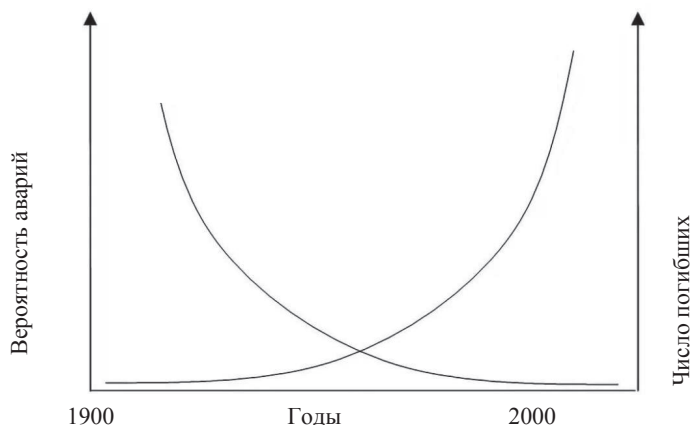


Рис. 1. Вероятность аварий и число погибших пассажиров в ходе развития авиации

Как результат, все это разнообразие, сложность и новизна технологий определяют многообразие проблем, связанных с обеспечением безопасности, решать которые часто приходится в короткие сроки, не останавливая при этом основное производство.

Кроме того, повышение производственной безопасности иногда невыполнимо по причине сложности технологических процессов и повышенных требований к точности выполняемых работ, то есть изменения в источнике опасностей становятся невозможными.

В связи с этим основной мерой по обеспечению безопасности становится создание новых технологий и устройств, которые уменьшают вредное влияние технологических процессов на обслуживающий персонал, а также внедрение эффективных организационных и управленческих решений.

2.2. Концепция развития современного производства

Концепция развития современного производства заключается в применении комплексного подхода в обеспечении безопасности на производственных объектах вне зависимости от отрасли и вида их деятельности. Это проявляется в первую очередь в формировании системы взаимосвязанных элементов управления бизнесом в целом, в числе которых обязательно присутствует организационная структура, направленная:

- на снижение травматизма и профессиональных заболеваний;
- предотвращение негативного воздействия на окружающую среду;
- обеспечение соблюдения законодательных и других требований в области охраны труда, промышленной и пожарной безопасности;
- повышение производственной эффективности за счет высокого уровня культуры безопасности производств.

Такая единая система позволит активно управлять производственной безопасностью и быстро реагировать на все изменения на предприятии, которые могут оказать негативное воздействие на здоровье людей.

Для обеспечения комплексности системы производственной безопасности необходимы следующие группы мероприятий: правовые, организационные, экономические, технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические.

2.3. Правовые аспекты производственной безопасности

Правовые основы в области обеспечения производственной безопасности заложены в следующих документах: Федеральный закон о промышленной безопасности опасных производ-

ственных объектов № 116 от 21 июля 1997; Положение о федеральном государственном надзоре в области промышленной безопасности № 1170 от 15.11.2012; Федеральный закон «О безопасности» от 28.12.2010 № 390-ФЗ; различные нормативные правовые акты, регулирующие отношения в сфере обеспечения промышленной безопасности.

В нашей стране в последнее десятилетие законодательство в области промышленной безопасности претерпело существенные изменения. Так, в 2013 г. в Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» были введены новые понятия, определения, категории и требования. Например, указанный федеральный закон закрепил новую категорию — класс опасности опасного производственного объекта, расширил нормативное понимание классификации опасных производственных объектов.

Кроме того, в области промышленной безопасности стало широко использоваться понятие риска, для чего разрабатываются и принимаются нормативно-правовые акты и нормативные технические документы.

Федеральный закон о промышленной безопасности опасных объектов от 21.07.1997 № 116-ФЗ является основным нормативным документом в области промышленной безопасности. Он определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов, направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности эксплуатирующих опасные производственные объекты юридических лиц и индивидуальных предпринимателей.

В главе 1 приводятся общие понятия и положения, устанавливаются требования и рамки правового регулирования в области промышленной безопасности, определяются федеральные органы исполнительной власти в области промышленной безопасности.

В статье 1 даются основные понятия, используемые в законе, такие как: промышленная безопасность опасных производственных объектов, авария, инцидент и т. п.

В статье 2 вводится понятие опасного производственного объекта. Перечислены категории опасных производственных объектов. Кроме того, указано, какие объекты не относятся к опасным производственным объектам.

В зависимости от уровня потенциальной опасности аварий на опасном производственном объекте ведется их деление на четыре класса опасности:

- I класс опасности — опасные производственные объекты чрезвычайно высокой опасности;
- II класс — опасные производственные объекты высокой опасности;
- III класс — опасные производственные объекты средней опасности;
- IV класс — опасные производственные объекты низкой опасности.

Глава II содержит основы промышленной безопасности.

В статье 6 определяются виды деятельности в области промышленной безопасности. К ним относятся: проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, капитальный ремонт, техническое перевооружение, консервация и ликвидация опасного производственного объекта; изготовление, монтаж, наладка, обслуживание и ремонт технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте; проведение экспертизы промышленной безопасности.

Статья 7 определяет обязательность экспертизы промышленной безопасности технического устройства, применяемого на опасном производственном объекте.

Статья 8 устанавливает требования промышленной безопасности к проектированию, строительству, реконструкции, капитальному ремонту, вводу в эксплуатацию, техническому перевооружению, консервации и ликвидации опасного про-

изводственного объекта. В частности, в статье оговаривается, что одним из обязательных условий принятия решения о начале строительства, реконструкции, капитального ремонта, ввода в эксплуатацию, технического перевооружения, консервации и ликвидации опасного производственного объекта является наличие положительного заключения экспертизы промышленной безопасности проектной документации.

В статье 9 перечислены требования промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта. Кроме того, указаны обязанности организации, эксплуатирующей опасный производственный объект. Определены также обязанности работников опасных производственных объектов.

Статья 10 описывает требования промышленной безопасности по готовности к действиям по локализации и ликвидации последствий аварии на опасном производственном объекте. В статье перечисляются обязанности организации, эксплуатирующей опасный производственный объект, по обеспечению готовности к действиям по локализации и ликвидации последствий аварии.

В статье 11 содержатся требования к организации производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности и управления промышленной безопасностью.

Статья 12 рассматривает объем и содержание технического расследования причин аварии.

Статья 13 описывает процедуру проведения экспертизы промышленной безопасности. Перечисляются объекты, подлежащие экспертизе промышленной безопасности.

В статье 14 идет речь о разработке декларации промышленной безопасности, указывается, в каких случаях декларация должна быть вновь разработана, кем утверждается и кому представляется.

Статья 15 определяет обязательное страхование гражданской ответственности за причинение вреда в результате аварии или инцидента на опасном производственном объекте.

Статья 16 описывает процедуру проведения федерального государственного надзора в области промышленной безопасности.

Статья 17 устанавливает ответственность за нарушение законодательства в области промышленной безопасности.

Основные принципы обеспечения безопасности изложены в Федеральном законе от 28.12.2010 № 390-ФЗ (ред. от 05.10.2015) «О безопасности». К этим принципам относятся:

- соблюдение и защита прав и свобод человека;
- законность;
- системность и комплексность применения органами государственной власти политических, организационных, социально-экономических, информационных, правовых и иных мер обеспечения безопасности;
- приоритет предупредительных мер в целях обеспечения безопасности; взаимодействие органов государственной власти с общественными объединениями, международными организациями и гражданами в целях обеспечения безопасности.

В целях обеспечения производственной безопасности используют четыре основные группы принципов.

I. Ориентирующие принципы, которые включают в себя идеи для нахождения безопасных решений и накопления информации по ним. К ним относят:

1. Принцип активности оператора: достигается тем, что человек, не участвуя физически в управлении процессом, постоянно готов вмешаться в него (например, работа диспетчера).

2. Принцип гуманизации деятельности заключается в освобождении человека от механического труда, от дробления трудового процесса, которое приводит к монотонному и несодержательному труду, от чрезмерного централизованного планирования и принудительной организации труда, от использования вредных для здоровья производственных веществ и материалов и др.

3. Принцип системности достигается учетом всех элементов, формирующих опасные или вредные производственные факторы.

4. Принцип деструкции используется для поиска такого элемента в системе, при удалении которого возможно было бы не допустить несчастного случая (например, понижение температуры в помещении не позволяет произойти самовозгоранию паров топлива или органической пыли).

5. Принцип снижения опасности заключается не в полной ликвидации опасности, а в снижении ее до безопасного уровня (например, снижение напряжения до 36 В при пользовании электроинструментом без заземления).

6. Принцип замены оператора направлен на замену человека роботизированной техникой.

7. Принцип ликвидации опасности заключается в устранении опасных и вредных факторов при выполнении технологических процессов.

8. Принцип классификации: деление объектов на классы и категории по тому или иному существенному свойству или признаку. Примерами данного принципа являются определение категории производств (помещений) по взрывопожарной опасности, категорирование помещений по электробезопасности и др.

II. Технические принципы основаны на использовании физических законов с применением технических средств. К ним относятся следующие:

1. Принцип блокировки, который позволяет исключить возможность доступа человека в опасную зону (например, защитный кожух, который закрывается при приближении человека к опасной зоне).

2. Принцип слабого звена состоит во введении в рассматриваемую систему ослабленных элементов, которые воспринимают изменение соответствующего параметра и реагируют на него — разрушаются, обеспечивая при этом сохранность объ-

ектов и безопасность людей. К таким устройствам можно отнести предохранительные клапаны, разрывные мембраны, плавкие вставки, легкосбрасываемые конструкции и др.

3. Принцип прочности направлен на повышение уровня безопасности наиболее ответственных элементов конструкций. Это может быть достигнуто повышением коэффициента запаса прочности.

4. Принцип экранирования состоит в установке на пути распространения опасности преграды, обеспечивающей защиту (шумозащитные экраны и т. п.).

III. Организационные принципы — это принципы, которые для повышения безопасности реализуют положение о научной организации деятельности. К ним относятся следующие:

1. Принцип защиты временем, который предполагает сокращение длительности пребывания человека под воздействием опасных или вредных факторов до безопасных значений.

2. Принцип нормирования, состоящий в гигиеническом нормировании условий, соблюдение которых обеспечивает необходимый уровень безопасности (предельно допустимой концентрации вредных веществ, уровня излучений, нормы переноски и подъема тяжести, продолжительность трудовой деятельности и др.).

3. Принцип эргономичности состоит в том, что для обеспечения безопасных условий труда необходимо учитывать антропометрические, психофизические и психологические свойства человека.

4. Принцип информации заключается в обучении и в усвоении персоналом сведений, обеспечивающих необходимый уровень безопасности (инструктаж, обучение, предупреждающие знаки, сигнализация).

5. Принцип резервирования состоит в одновременном применении нескольких устройств, способов, приемов, направленных на защиту от одной и той же опасности (например, наличие не менее двух эвакуационных выходов).

6. Принцип подбора кадров заключается в подборе людей по специальности, опыту работы, формировании структуры служб и отделов, которые были бы способны обеспечить необходимый уровень безопасности на производстве.

7. Принцип последовательности состоит в формировании определенной очередности выполнения операций, процессов, регламентных работ для снижения уровня опасности (допуск к выполнению работы после проведения инструктажа по технике безопасности).

IV. Управленческие принципы — это принципы, которые определяют взаимосвязи и отношения между отдельными стадиями и этапами процесса обеспечения безопасности. К ним относятся:

1. Принцип плановости, который заключается в установлении на определенном уровне количественных показателей и направлений деятельности. В области безопасности планирование направлено, прежде всего, на улучшение условий труда.

2. Принцип стимулирования состоит в материальных и моральных поощрениях в зависимости от результатов труда работающего.

3. Принцип компенсации состоит в предоставлении льгот и компенсаций при выполнении работ во вредных условиях.

4. Принцип эффективности заключается в сопоставлении фактических результатов с плановыми и оценке достигнутых показателей по критериям затрат и выгод (контроль уровня травматизма на производстве, улучшение условий труда по сравнению с принятыми обязательствами).

5. Принцип контроля состоит в организации органов контроля и надзора с целью проверки объектов на соответствие их регламентированным требованиям безопасности.

6. Принцип обратной связи заключается в организации системы получения информации о результатах воздействия управляющей системы на управляемую систему путем сравнения параметров соответствующих состояний (контроль над расходом топлива в зависимости от скорости движения автомобиля).

7. Принцип ответственности означает, что для обеспечения безопасности должны быть регламентированы права, обязанности и ответственность лиц, которые участвуют в управлении безопасностью (руководитель предприятия отвечает за здоровье и жизни людей, а контроль за условиями труда возложен на работника службы охраны труда).

2.4. Методы и средства обеспечения производственной безопасности

Для выполнения любой из задач по обеспечению безопасности трудовой деятельности после выбора принципов необходимо определить методы ее обеспечения и предусмотреть соответствующие средства безопасности человека и производственной среды.

Обеспечение безопасности оборудования и технологических процессов для обслуживающего их персонала достигается тремя основными методами.

Первый метод состоит в пространственном и (или) временном разделении гомосферы и ноксосферы. Это достигается средствами дистанционного управления, автоматизации, роботизации и т. п.

При невозможности реализации первого метода может быть использован второй метод, который состоит в нормализации ноксосферы путем уменьшения опасностей. Это совокупность мероприятий, защищающих человека от воздействия вредных и опасных факторов, — обеспечивается средствами коллективной защиты.

Третий метод включает приемы и средства, направленные на адаптацию человека к соответствующей среде и повышение его защищенности. Данный метод реализуется профотбором, обучением, психологическим воздействием, средствами индивидуальной защиты (СИЗ).

В реальных условиях реализуется комбинация вышеперечисленных методов. Следует отметить, что принципы и методы в той или иной мере связаны между собой.

Существует три основных группы средств обеспечения безопасности:

1. Средства коллективной защиты (СКЗ) — вентиляция, заземление, ограждения, изоляция (шумовая, тепловая, электрическая и т. п.), экранирование.

Средства коллективной защиты классифицируются в зависимости от опасных и вредных факторов (средства защиты от шума, вибрации, электрических разрядов и т. д.).

По техническому исполнению СКЗ подразделяются на следующие группы: ограждения; блокировочные, тормозные, предохранительные устройства; световая и звуковая сигнализация; приборы безопасности; устройства автоматического контроля, дистанционного управления, заземления, вентиляции; отопление; освещение; изолирующие средства и др.

2. Средства индивидуальной защиты (СИЗ) — специальная одежда, каски, противогазы, маски, очки, наушники, световые фильтры, специальная обувь и т. д.

СИЗ классифицируются в основном в зависимости от защищаемых органов (дыхания, рук, головы, лица, глаз и т. д.). К СИЗ относятся противогазы и респираторы, маски, различные виды специальной одежды и обуви, рукавицы, перчатки, каски, шлемы, противошумные шлемы, защитные очки, предохранительные пояса, дерматологические средства и др. Эти средства следует рассматривать как вспомогательные и временные меры защиты от опасных и вредных факторов.

3. Повышение надежности систем. Под надежностью систем понимается свойство систем выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных показателей. Показатели надежности: среднее время безотказной работы (СВБР), вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

Контрольные вопросы

1. Каковы отличительные черты постиндустриального общества?
2. Почему быстрая смена технологий, внедрение новых процессов и материалов являются одним из факторов риска современного производства?
3. С какими факторами трудового процесса связаны профессиональные заболевания, возникающие при работе на автоматизированном оборудовании?
4. Какая основная мера по обеспечению безопасности должна использоваться на современном производстве?
5. В чем заключается концепция развития современного производства?
6. В каких документах содержатся правовые основы в области обеспечения производственной безопасности?
7. Что определяет, на что направлен Федеральный закон о промышленной безопасности опасных объектов?
8. Какие классы опасности производственных объектов определены Федеральным законом о промышленной безопасности?
9. Какие основные принципы обеспечения безопасности изложены в Федеральном законе «О безопасности»?
10. Что включают в себя ориентирующие принципы обеспечения безопасности?
11. Что относится к техническим принципам обеспечения безопасности?
12. В чем заключаются организационные принципы обеспечения безопасности?
13. Что определяют управленческие принципы обеспечения безопасности?
14. Какие существуют методы обеспечения безопасности?
15. Какие группы средств используются для обеспечения безопасности?

3. Использование высокотемпературных процессов в промышленном производстве

Высокая температура является одним из важнейших факторов, направленных на интенсификацию химических реакций, поэтому высокотемпературные процессы получили в промышленности широкое применение.

Большинство традиционных процессов производства промышленной продукции являются высокотемпературными. К таким процессам относится производство чугуна и стали, большого числа цветных металлов, различных видов искусственного топлива, строительных материалов, производство минеральных удобрений, а также фосфора, карбидов, корунда, соляной кислоты и множества органических веществ, получаемых на основе высокотемпературной переработки топлива и т. д. [5, с. 76].

Данные процессы являются практически единственным средством получения и улучшения промышленных материалов в связи с легкостью их осуществления, доступностью и универсальностью. В некоторых случаях традиционные термические процессы обработки материалов заменяются и дополняются в современной промышленности прогрессивными физико-термическими, электрохимическими и электрофизическими, ультразвуковыми, плазменными, лазерными и другими методами воздействия. Примерами могут служить лазерная и плазменная сварка и резка металлов, кристаллизация расплавов металлов в ультразвуковом поле, электролитическое рафинирование меди, инфракрасная, вакуумная и ультразвуковая сушка материалов.

Значение высокотемпературных процессов в промышленности и в настоящее время трудно переоценить. Большинство этих процессов протекают при температурах свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (коксование угля, производство чугуна, стали, цемента, стекла и т. д.). Однако ряд процессов, проходящих и при более низкой температуре ($300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$), таких как перегонка древесины, полукоксование твердых видов топлива, термическая переработка нефти, также следует отнести к высокотемпературным, поскольку температура является главным фактором интенсификации этих процессов для получения максимального выхода продукции с высокими технико-экономическими показателями.

Здесь же следует подчеркнуть, что многие химико-технологические процессы, протекающие при высоких температурах (например, производство аммиака при $450\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$), не относят к высокотемпературным, поскольку в этом случае решающим интенсифицирующим фактором является давление и катализатор, а не температура [5, с. 77].

3.1. Высокотемпературные процессы в металлургии и оборудование для их проведения

Высокотемпературные, или так называемые пирометаллургические, процессы восстановления металлов из руд широко применяются в черной и цветной металлургии.

Восстановление металлов из руд в пирометаллургии сводится к воздействию на руду в условиях высоких температур (свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) различными восстановителями. Наиболее распространенными восстановителями являются кокс, оксид углерода, образующийся из кокса в процессе его неполного окисления, генераторные газы, содержащие оксид углерода и водород, и, наконец, для ряда ценных металлов, таких как молибден, вольфрам, германий, в качестве восстановителя применяют водород.

Основным типовым оборудованием высокотемпературных процессов являются печи. Современная промышленная печь — это аппарат, в котором для тепловой обработки материалов используется теплота от сжигания топлива, электрический нагрев либо утилизируемая теплота экзотермических процессов. В таком аппарате выделение и использование теплоты совмещено с осуществлением определенного технологического процесса, например с выплавкой металла, обжигом керамических изделий, коксованием углей, перегонкой нефти и т. п.

Обычно конструкция печей очень простая и прочная, загрузка и выгрузка механизирована, система поддержания и устойчивой работы в течение определенного времени является автоматической (в сталеплавильных печах огнеупорная футеровка выдерживает до 500 плавов, а в кислородных конверторах — до 700–900 плавов).

В связи с тем, что типы и конструкции печей бывают очень разнообразными, их (печи) классифицируют не только по отраслям производства, но и по технологическому назначению, источнику тепловой энергии, способу нагрева, способу загрузки сырья и т. д.

Основные виды промышленных печей крупнотоннажного производства (с учетом принципа их устройства и работы) и осуществляемые ими процессы приведены в табличной форме [5, с. 80]:

Типы печей	Осуществляемые процессы
Шахтные (в том числе доменные, цветной металлургии, газогенераторные)	Выплавка чугуна, меди, свинца, никеля; газификация твердого топлива
Полочные	Обжиг колчедана, руд цветных металлов и солей
Взвешенного (кипящего) слоя	Газификация и пиролиз твердого топлива, разложение тяжелых нефтяных остатков, обжиг колчедана, руд цветных металлов

Типы печей	Осуществляемые процессы
Барабаны вращающиеся	Производство цементного клинкера, глинозема, разложение бикарбоната натрия, обжиг колчедана, глины, доломита, восстановление сульфатов, обезвреживание различных материалов
Туннельные	Обжиг огнеупоров, керамики, изделий на их основе
Камерные	Коксование каменного угля, отжиг спека, обжиг керамики, огнеупоров, строительного кирпича
Ванные, в том числе отражательные	Выплавка стали, цветных металлов, стекла, сжигание серы
Конвертор	Выплавка и переплавка стали и цветных металлов
Трубчатые	Пиролиз углеводородов, перегонка и крекинг нефти и нефтепродуктов
Электрические, в том числе:	
– дуговые;	Плавка и рафинирование цветных металлов, ферросплавов, стали, электрокрекинг метана
– сопротивления;	Получение кварцевого стекла, карбида кремния, графита, сероуглерода
– комбинированные;	Получение фосфора, электрокорунда, плавящихся огнеупоров, электролиз расплавов
– индукционные	Переплавка металлов и сплавов, варка кварцевого стекла

Сравнительную оценку печей производят по ряду технико-экономических показателей. Среди них решающими являются: интенсивность передачи теплоты нагреваемому материалу; коэффициент использования теплоты, который тем выше, чем меньше тепловые потери и удачнее выбран способ регенерации теплоты; выход продукта при высоком его качестве.

В прошлом и в настоящее время традиционные высокотемпературные процессы в черной металлургии — доменный процесс производства чугуна и производство стали в различных печах.

1. Доменный процесс.

Основной способ производства чугуна — получение его путем восстановительной плавки железной руды в доменных печах, где одновременно с восстановлением железа происходит процесс его науглероживания и превращение в чугун. Исходными материалами для производства чугуна являются железные руды, топливо и флюсы.

Технико-экономические показатели работы доменной печи зависят от содержания железа в руде, степени ее подготовки к плавке, качества топлива, степени интенсификации процесса, конструкции печи и ее полезного объема, степени автоматизации и механизации процессов доменного производства.

2. Сталеплавильные процессы.

В современной металлургии сталь выплавляют в кислородных конвертерах, мартеновских и электрических печах (дуговых и индукционных). Для получения стали особо высокого качества применяют рафинирование или электрошлаковый переплав.

Исходным материалом для производства стали являются перелый чугун и скрап (стальной и чугунный лом, стружка, обрезки и т. п.).

Процесс производства стали заключается в удалении из чугуна избытков углерода, кремния, марганца, серы, фосфора и других элементов. Для этого расплав железа нагревают до высоких температур. Нагрев может осуществляться двумя способами: химической теплотой, полученной в результате окисления примесей в чугуне, или теплотой, полученной за счет сжигания топлива или превращения электрической энергии в тепловую.

Наиболее важные тенденции развития сталеплавильного производства: рост выплавки стали преимущественно кислородно-конвертерным способом (снижение доли мартеновской стали); увеличение мощности агрегатов; совершенствование технологии плавки; расширение сортамента сталей. Начинают развиваться и внедоменные способы производства стали.

Свыше половины всей выплавляемой в мире стали производится в кислородно-конвертерных цехах. К преимуществам кислородно-конвертерного способа относятся: высокая интенсификация плавки за счет продувки кислородом; стабильность сортамента выплавляемой стали; возможность получения высококачественных сталей, в том числе низколегированных сталей для листового и сортового проката, труб, химического оборудования, для электротехнических целей и т. д.; резкое увеличение емкости конвертеров до 250–350 т; стойкость футеровки конвертеров; сокращение продолжительности плавки до 30 мин. Один конвертер вместимостью 250 т дает 1200 тыс. т стали в год, тогда как мартеновская печь (500 т) дает около 400 тыс. т стали в год.

Более совершенным методом производства стали является ее выплавка в электропечах, в которых можно получать более высокие температуры (до 6000 °С), чем иными методами. Действительно, в настоящее время наблюдается возрастание производства стали данным методом. Этот способ производства в высокотемпературном режиме позволяет получать сталь с максимальным удалением вредных примесей (серы и фосфора) и, кроме этого, сталь с большим содержанием тугоплавких легирующих элементов. Так как процесс ведется с меньшим доступом воздуха, но при более высокой интенсивности, в электропечах отмечается снижение потерь железа вследствие его угара.

Однако развитие электрометаллургии не имеет масштабного характера вследствие малой производительности процесса, большого потребления электроэнергии, а соответственно, высокой себестоимости стали (продолжительность плавки в 100-тонной печи составляет 6–7 ч при расходе электроэнергии на 1 т стали около 600 кВт·ч).

3.2. Тенденции совершенствования высокотемпературных процессов

Высокотемпературные процессы, применяемые в промышленности, не всегда показывают высокий экономический эффект. Причины этого — многостадийность производств, высокая доля ручного и тяжелого физического труда на вспомогательных операциях в горячих цехах, большие затраты сырья и энергии, трудности в механизации и автоматизации как периодических, так и полунепрерывных процессов (производство чугуна, коксование угля).

Исходя из этого в настоящее время наметилось несколько тенденций совершенствования высокотемпературных процессов. В первую очередь это замена устаревших процессов другими, более прогрессивными. В качестве примеров можно привести внедоменное восстановление железа из руд, замену огневого рафинирования меди электролитическим, термического крекинга метана — плазменным, а термического крекинга нефтяных фракций — каталитическим.

Другая тенденция — модернизация отдельных технологических операций и использование агрегатов большой единичной мощности. Например, в сталеплавильном производстве опережающее развитие получает кислородно-конвертерный передел, совершенствуется техника и технология внепечной обработки и разливки стали, а также методы повышения качества металлов в результате применения ультразвука, магнитного поля и др. Весьма эффективен и переход к более крупным и мощным агрегатам. Как правило, это обеспечивает значительное уменьшение себестоимости продукции и снижение ее фондоемкости. Например, при увеличении объема доменной печи в 12 раз годовая выплавка чугуна возрастает более чем в 10 раз, а удельные капитальные затраты на одну тонну уменьшаются при этом не менее чем на $1/3$.

Еще одним направлением в совершенствовании высокотемпературных процессов является использование новых, более современных типов конструкций печей взамен традиционных. Так, в цветной металлургии сернокислотном производстве происходит замена механических полочных печей для обжига колчедана и сульфидных руд на печи с взвешенным (кипящим) слоем. Существенные достоинства данного метода обжига колчедана:

1) возможность получения концентрированного сернистого газа ($12\text{--}15\% \text{SO}_2$) с низким содержанием серного ангидрида и мышьяка в обжиговом газе; в результате лучшего выгорания серы полнее и экономичнее используется сырье, улучшается качество конечного продукта;

2) высокая интенсивность данного типа печей: так, интенсивность печей с взвешенным слоем в 80 раз выше интенсивности механических печей и в 4 раза — печей пылевидного обжига.

Еще одна тенденция связана с созданием экологически безвредных, безотходных, энерго- и ресурсосберегающих производств. Например, в металлургии доменные и мартеновские шлаки перерабатывают в фосфатные удобрения для сельского хозяйства; пемзу, щебень, шлакоцемент, ситалы и шлаковату используют в строительной индустрии. Колошниковую пыль при агломерации спекают с рудой и возвращают в основное производство. Теплоту отходящих газов используют для подогрева воздуха, сырья и вспомогательных материалов, расплавления шихты, получения пара в котлах-утилизаторах и горячей воды для бытовых целей. Создание прогрессивных, безотходных, малоэнергоемких производств является важнейшим направлением в модернизации и совершенствовании высокотемпературных процессов.

Контрольные вопросы

1. Какие высокотемпературные процессы используются для производства промышленной продукции?
2. За счет каких процессов осуществляется тепловая обработка материалов в современных печах?
3. Какие традиционные высокотемпературные процессы используются в черной металлургии?
4. Какие тенденции совершенствования высокотемпературных процессов используются в современной промышленности?

4. Обеспечение безопасности при проведении высокотемпературных процессов

4.1. Закономерности, обусловленные высокотемпературными процессами

Высокотемпературные процессы являются самым крупным потребителем энергоресурсов. В связи с этим создание оптимального температурного режима процесса является универсальным средством увеличения его скорости, повышения выхода продукции, а также экономии электроэнергии.

Влияние температуры на процессы, идущие в кинетической области

Существенное влияние температуры больше всего сказывается на процессах, протекающих в кинетической области. Характер этого влияния зависит от теплового эффекта реакции.

Эндотермические обратимые реакции наиболее сильно интенсифицируются при повышении температуры, так как при этом, согласно принципу Ле Шателье, увеличивается равновесный выход и увеличивается скорость реакции, т. е. уменьшается время, необходимое для достижения равновесия [5, с. 75].

Если протекают обратимые эндотермические реакции



где Q — тепловой эффект реакции, то с повышением температуры равновесие реакции сдвигается слева направо и, таким образом, увеличивается равновесная степень превращения X_p . Зависимость степени превращения X от температуры для обратимой эндотермической реакции при неизменных концентрации, давлении и продолжительности взаимодействия показана на рис. 2 [5, с. 76].

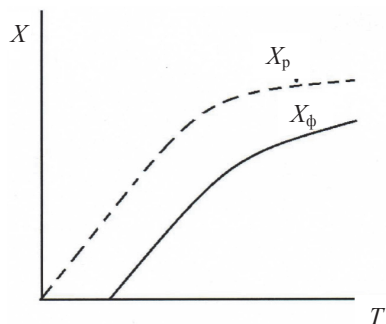


Рис. 2. Зависимость степени превращения X от температуры T для обратимой эндотермической реакции

При прочих равных условиях фактическая степень превращения X_ϕ вследствие увеличения скорости реакции при высоких температурах сближается с равновесной степенью превращения X_p , в то время как эти величины значительно отличаются при низких температурах. Например, для эндотермического синтеза оксида азота NO из воздуха в количестве 50 % от равновесной концентрации требуется при 1230 °С — 30 ч, при 1630 °С — 124 с, при 2030 °С — 0,22 с. В качестве другого примера можно привести термический крекинг нефти, где время, необходимое для получения 30 % выхода бензина, уменьшается с ростом температуры следующим образом:

Температура, °С	400	425	450	475	500
Время, мин	720	120	20	3	0,5

Эндотермические процессы, осуществляемые в промышленности при высоких температурах, получили широкое распространение. К таким процессам относятся: восстановление металлов из оксидов (производство чугуна, стали, многих цветных металлов); расщепление молекул углеводородов и их производных в процессах коксования угля, крекинга жидких нефтепродуктов и газов; диссоциация карбонатов кальция и магния для производства строительных материалов и соды; процессы получения карбидов, корунда. Кроме того, к ним можно отнести и высокотемпературный обжиг, который является основным процессом производства важнейших строительных материалов, таких как цемент, строительная керамика, облицовочные материалы, огнеупоры, тонкая и специальная керамика и т. д.

Экзотермические обратимые реакции, преобладающие в химических производствах, интенсифицируются за счет увеличения скорости прямой реакции. Для обратимых экзотермических реакций изменение степени превращения X в зависимости от температуры T представлено на рис. 3 [5, с. 76].

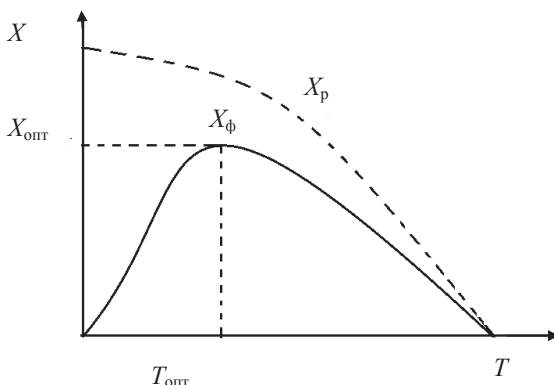


Рис. 3. Скорость обратной эндотермической реакции при повышении температуры

Скорость обратной эндотермической реакции при повышении температуры, начиная с некоторого предела, возрастает быстрее, чем прямой. В то же время равновесие экзотермических реакций сдвигается при повышении температуры в сторону исходных продуктов, и равновесная степень превращения падает. В начальный период экзотермической реакции рост температуры резко увеличивает скорость прямой реакции, что приводит к повышению фактической степени превращения X_f .

Однако по мере роста температуры и роста скорости обратной реакции фактическая степень превращения снижается. Таким образом, кривая зависимости фактической скорости превращения в экзотермической реакции имеет максимум, соответствующий оптимальной температуре, при которой возможны наибольший выход продукции и наивысшая суммарная скорость процесса.

Такой вид зависимости характерен для многих химических процессов окисления, например NO в NO_2 ; SO_2 в SO_3 и др. Поскольку применение высоких температур здесь резко ограничено, для проведения большинства экзотермических химических превращений требуются другие, более активные виды воздействия: катализатор, давление и т. п. [5, с. 77].

Влияние температуры на скорость процессов, идущих в диффузионной области

Химико-технологические процессы в подавляющем большинстве представляют собой гетерогенные многофазные процессы, проходящие в несколько стадий. Наиболее медленной стадией большинства твердофазных процессов является стадия диффузии. Поэтому интенсификация процессов, протекающих в диффузионной области, сводится к увеличению скорости диффузии исходных веществ и продуктов реакции.

На скорость диффузии влияют различные факторы: вязкость (η), плотность (ρ), температура (T), давление (p); скорости по-

токов взаимодействующих фаз, интенсивность перемешивания; конструкционные особенности аппарата, поверхность контакта фаз (F), время контактирования и т. д.

В однородной (гомогенной) среде влияние температуры на коэффициент диффузии (D) невелико.

Коэффициент диффузии для газов составляет $0,1\text{--}1\text{ см}^2/\text{с}$. Для различных газов этот коэффициент очень незначительно (в $1,5\text{--}2$ раза) зависит от температуры. Диффузия в жидкостях протекает медленнее, чем в газах, и коэффициенты диффузии большинства жидкостей составляют $10^4\text{--}10^5\text{ см}^2/\text{с}$. Повышение температуры заметно увеличивает коэффициент диффузии в жидкостях ($D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$, в том числе за счет уменьшения вязкости).

Наиболее медленна диффузия в твердых телах, где коэффициент диффузии составляет $1\text{ см}^2/\text{год} \text{--} 1\text{ см}^2/\text{век}$. Повышение температуры увеличивает подвижность твердых частиц, ускоряет переход диффундирующего атома из одного положения в другое. Например, для оксидов типа FeO , CaO , MgO в интервале температур $1000\text{--}1500\text{ }^\circ\text{C}$ коэффициент диффузии изменяется в пределах $10^8\text{--}10^{-14}\text{ см}^2/\text{с}$, а диффузия углерода в железо при термической обработке металлов при температуре $900\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ происходит за несколько часов. Из курса молекулярной физики известно, что влияние температуры на скорость диффузии меньше, чем на скорость химических превращений.

Определяющим и сдерживающим фактором, когда скорость химической реакции на высоких температурах велика, является скорость диффузии. Например, при газификации топлива или обжиге сульфидных руд повышение температуры переводит процесс из кинетической в диффузионную область. Поэтому так важно интенсифицировать твердофазные процессы, протекающие в диффузионной области, не только традиционными вышеописанными способами ускорения диффузии, но и изменением фазового состояния с помощью увеличения температуры.

Когда изменяется фазовое состояние вещества (при расплавлении, возгонке и др.), происходит резкое увеличение скорости диффузии и интенсификация процесса в целом. Возникновение небольших количеств жидкой фазы в таких процессах, как спекание, обжиг при производстве керамики, цемента, глинозема, ферритовых материалов, приводит к значительному возрастанию коэффициентов диффузии и поверхности контакта фаз. Это, в свою очередь, может перевести процесс в переходную область, где скорости химических превращений и диффузии сопоставимы, затем — в кинетическую область, в результате чего окончательно завершаются химические реакции и формируется окончательный продукт. Появление газовой фазы в доменном процессе и при газификации твердого топлива также переводит процесс, прежде идущий в диффузионной области, в кинетическую.

Таким образом, повышение температуры следует рассматривать не столько как фактор, ускоряющий процесс в диффузионной области, но и как средство перевода гетерогенных систем в гомогенные, а твердофазных — в жидко- и газофазные [5, с. 78].

Условия, ограничивающие применение высоких температур

Несмотря на положительное влияние на скорость химических реакций, повышение температуры процессов на практике ограничивается рядом требований экономического и технологического характера.

Так, например, для эндотермических процессов высокие температуры наиболее благоприятны. Однако выход продукции повышается значительно медленнее, чем идет нарастание температуры. Следовательно, в данном случае необходимо выбрать экономически обоснованную температуру ведения процесса.

Для экзотермических процессов повышение температуры выше оптимальной ведет к резкому снижению суммарной ско-

рости процесса и к уменьшению выхода продукции, что препятствует значительному повышению температуры в экзотермических реакциях.

В ряде случаев увеличение температуры приводит к побочным реакциям, что выражается в появлении опасных и вредных веществ, ухудшению качества и уменьшению количества основного продукта. Значительный рост температуры в некоторых производственных процессах приводит к удалению реагирующих веществ из сферы реакции из-за испарения жидких, частичного сплавления или спекания твердых материалов, что оказывает вредный эффект на выпускаемую продукцию.

Кроме того, повышение температуры реакции ограничено термической стойкостью конструкционных материалов, из которых изготовлена аппаратура. Основным материалом, применяемым для промышленных печей и аппаратов, работающих в условиях высокотемпературного (выше 1000 °С) нагрева, являются огнеупоры, способные выдерживать многократные колебания температуры в широких пределах. Особо высокой теплоустойчивостью отличаются магнезитовые изделия (выше 2000 °С), а также графит. Большинство же конструкционных материалов — металлы и их сплавы — в основном работают в пределах до 1000 °С, жаропрочные стали — до 700 °С, немногим выше термостойкость строительной керамики.

Повышение температуры лимитируется также и энергетическими затратами из-за возникающего резкого роста теплотер в окружающую среду.

Таким образом, оптимальной температурой в высокотемпературных процессах может служить лишь экономически рациональная температура, выбранная с учетом минимального износа аппаратуры, стоимости конструкционных материалов, теплотер и других показателей [5, с. 79].

4.2. Процессы, проходящие в условиях высоких температур

Высокотемпературные процессы, происходящие внутри печей, требуют их надежной защиты от потерь теплоты через стенки.

Это связано, во-первых, с тем, что в производственной обстановке рабочие, находясь вблизи оборудования с температурным процессом, подвергаются действию теплоты, излучаемой этими источниками. Повышенная температура поверхностей оборудования и обрабатываемых материалов, повышенная температура воздуха рабочей зоны, излучение (световое, ультрафиолетовое и тепловое) будут одними из опасных и вредных факторов, воздействующих на обслуживающий персонал.

Во-вторых, надежная защита стенок печи требуется для эффективного проведения технологического процесса как с точки зрения качества выпускаемой продукции, так и для экономии энергоресурсов.

Для организации такой защиты необходимо знать процессы распределения тепла в различных средах.

Физическое явление, которое описывает процесс распределения теплоты в системе тел или внутри отдельного тела, называется *теплопередачей*.

Теплота передается от более нагретого тела к менее нагретому. Количество теплоты измеряется в Дж, кДж или кВт·ч.

Количество теплоты, отнесенное к единице времени, называют *тепловым потоком*.

Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, называется поверхностной *плотностью теплового потока*.

Совокупность значений температуры в данный момент времени для всех точек пространства называют *температурным полем*.

Температура t является функцией координат и времени: если температура зависит от времени, то температурное поле называют нестационарным. Если температура не изменяется во вре-

мени, то поле называется стационарным. В последнем случае поле трехмерное. Если $t = f(x, y)$ — двухмерное; если $t = f(x, y, z, \tau)$ — одномерное.

Геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру, образует *изотермическую поверхность*.

Разность температур двух точек, отнесенная к расстоянию между ними, называется *температурным градиентом*.

$$\text{grad } t = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta l},$$

где l — расстояние между изотермическими поверхностями.

Различают три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение.

Теплопроводность — это процесс передачи тепла от одних частей тела (твердого, жидкого, газообразного) к другому без заметного изменения микрочастиц друг относительно друга.

С помощью теплопроводности осуществляется перенос тепла от более нагретых частей тела к менее нагретым, который приводит к выравниванию температуры между ними. При теплопроводности перенос энергии осуществляется в результате непосредственной передачи энергии от частиц (молекул, атомов, электронов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией.

Основной закон распространения тепла путем теплопроводности (закон Фурье) имеет вид

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t,$$

где q — поверхностная плотность теплового потока (величина векторная), Вт/м²; $\text{grad } t$ — градиент температурного поля (совокупности числовых значений температуры в разнообразных местах системы в выбранный момент времени), единицы измерения К/м; λ — коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); знак «—» свидетельствует о том, что направление теплового потока и температурного градиента противоположны.

Численное значение λ показывает, какое количество теплоты проходит через стенку толщиной 1 м, имеющей поверхность 1 м², при разности температур на внутренней и наружной поверхностях стенки 1 °С.

Для газов $\lambda = 0,005\text{--}0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, и с увеличением температуры коэффициент теплопроводности увеличивается.

Для жидкостей $\lambda = 0,08\text{--}0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, и с увеличением температуры коэффициент теплопроводности уменьшается.

Для теплоизоляционных и огнеупорных материалов $\lambda = 0,2\text{--}10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, и с увеличением температуры коэффициент теплопроводности уменьшается.

Для металлов $\lambda = 2\text{--}360 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, и с увеличением температуры коэффициент теплопроводности уменьшается.

Теплопроводность плоской стенки

1. Однослойная стенка.

Имеем стенку толщиной S и материала с теплопроводностью λ . Температура наружных поверхностей стенки t_1 и t_2 и изменяется только в направлении оси x , т. е. температурное поле одномерное и плоские изотермические поверхности расположены параллельно оси t .

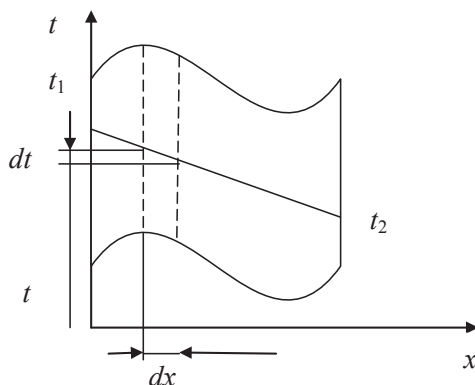


Рис. 4. Однослойная стенка

При стационарном температурном поле могут быть занесены граничные условия, так, $t = t_1$ при $x = 0$; $t = t_2$, $t_1 > t_2$ при $x = S$.

Рассмотрим слой стенки между двумя изотермическими поверхностями с температурой t и $t + \Delta t$.

Для этого слоя

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \text{ или } dt = -\frac{qdx}{\lambda}.$$

После интегрирования этого выражения получаем

$$t = -\frac{qx}{\lambda} + C,$$

где C — это константа интегрирования, которую определяем из граничных условий: $x = 0$, $t = t_1$,

$$t_1 = -\frac{q \cdot 0}{\lambda} + C.$$

При подстановке граничных условий $x = S$, $t = t_2$ и константы интегрирования $C = t_1$,

$$t_2 = -\frac{qS}{\lambda} + t_1.$$

Определяем поверхностную плотность теплового потока:

$$q = -\frac{\lambda(t_2 - t_1)}{S} = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{S} = \frac{(t_1 - t_2)}{R},$$

$R = \frac{S}{\lambda}$ — тепловое сопротивление стенки.

Тепловой поток через стенку с поверхности F (м):

$$Q = q \cdot F.$$

Количество теплоты за время τ (с):

$$Q_\tau = Q \cdot \tau,$$

$$q_1 = \frac{\lambda_1(t_1 - t_2)}{S_1} = \frac{(t_1 - t_2)}{R_1},$$

$$q_2 = \frac{\lambda_2 (t_2 - t_3)}{S_2} = \frac{(t_2 - t_3)}{R_2},$$

$$q_3 = \frac{\lambda_3 (t_3 - t_4)}{S_3} = \frac{(t_3 - t_4)}{R_3}.$$

2. Многослойная стенка.

Многослойной называется стенка, состоящая из нескольких разнородных слоев.

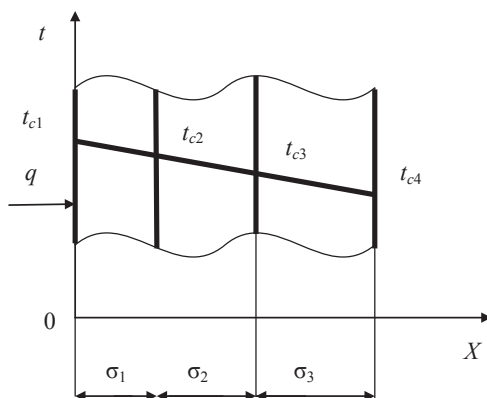


Рис. 5. Многослойная стенка

При стационарном температурном поле плотность теплового потока во всех слоях одинакова: $q_1 = q_2 = q_3 = q$.

Тогда изменение температуры в каждом поле:

$$(t_1 - t_2) = \frac{q \cdot S_1}{\lambda_1},$$

$$(t_2 - t_3) = \frac{q \cdot S_2}{\lambda_2},$$

$$(t_3 - t_4) = \frac{q \cdot S_3}{\lambda_3},$$

$$(t_1 - t_2) = q \left(\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} \right),$$

$$q = \frac{(t_1 + t_{n+1})}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}}.$$

При нестационарном тепловом потоке, т. е. нагревании или охлаждении, q_1, q_2, q_3 не зависят друг от друга.

3. Цилиндрическая стенка.

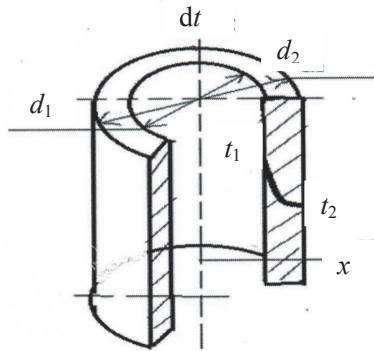


Рис. 6. Цилиндрическая стенка

При однослойной стенке

$$Q = 2\pi\lambda L \frac{(t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}.$$

При многослойной стенке

$$Q = 2\pi L \frac{(t_1 - t_{n+1})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}}.$$

Тепло, поступившее на поверхность нагреваемого тела, передается внутри него теплопроводностью.

Различают теплопередачу простую, например от газа к твердому телу, и в этом случае интенсивность передачи тепла характеризуется коэффициентом теплоотдачи a , и сложную (многоступенчатую) — от газа к газу через твердое тело. В этом случае интенсивность отдачи тепла определяется коэффициентом теплопередачи.

Конвекция — передача тепла от одних частей тела (жидкого, газообразного) к другим при интенсивном перемещении среды.

Передача тепла конвекцией связана с переносом самой среды, поэтому интенсивность передачи тепла зависит от характера движения и физических свойств среды. При ламинарном режиме движения газа или жидкости перемешивания среды не наблюдается и тепло от потока к поверхности передается теплопроводностью. При турбулентном движении частиц среды непрерывно перемещаются от центра потока к поверхности, что резко интенсифицирует передачу тепла. Но при турбулентном движении у самой поверхности сохраняется неперемешиваемый тонкий слой с ламинарным движением (слой Прандтля), через который тепло передается теплопроводностью. Чем выше турбулентность потока, тем тоньше этот слой и выше интенсивность теплопередачи.

Тепловой поток — от газа или жидкости конвекцией к поверхности и наоборот.

Закон Ньютона — Рихмана:

$$Q_k = a_k (t_1 - t_2) F,$$

где a_k — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²К); F — поверхность, м²; $t_1 - t_2$ — разность температур поверхности и газа.

По коэффициенту теплоотдачи можно судить об интенсивности теплоотдачи, т. е. о том, какое количество теплоты передается через поверхность, равную 1 м², за 1 с при разности температур между поверхностью и газом, составляющей 1 °С.

Этот коэффициент учитывает передачу теплоты и теплопроводностью.

Конвекция при свободном движении

Свободным называется движение газов или жидкостей, вызванное разностью плотностей нагретых и холодных частиц. Примером свободного движения является движение воздуха у нагретой поверхности печи. Температура стенки печи выше температуры воздуха — холодный воздух нагревается у стенки, плотность уменьшается, и он поднимается вверх. Такое движение воздуха будет происходить до тех пор, пока имеется разность температур стенки печи и окружающего воздуха.

$$a_k = n^4 \sqrt{(t_1 - t_2)},$$

где n — коэффициент, зависящий от расположения поверхностей; $t_1 - t_2$ — разность температур поверхности и газа.

Конвекция при вынужденном движении

Вынужденным называется движение, вызванное действием насоса, вентилятора. В этом случае применяются критерии подобия.

Критерий Нуссельта:

$$\text{Nu} = a_k \frac{l}{\lambda},$$

где l — гидравлический диаметр.

Он характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое. Этот критерий решает задачу внешнего теплообмена и коэффициента теплопроводности газа или жидкости.

Критерий Прандтля является мерой подобия температурных и скоростных полей и учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу:

$$Pr = \frac{\vartheta}{a},$$

$$\vartheta = \frac{\eta}{\rho},$$

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

где ϑ — коэффициент кинематической вязкости; a — коэффициент температуропроводности; η — коэффициент динамической вязкости; ρ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности газа (жидкости), Вт/(м·К); c — удельная теплоемкость.

В практических расчетах искомой величиной обычно является коэффициент теплоотдачи конвекцией a_k , входящий в критерий Nu.

Критериальное уравнение для стационарного вынужденного движения имеет вид

$$Nu = f(Re, Pr).$$

Определив значение критерия Нуссельта, можно найти a_k и далее Q_k . Теплопередача при вынужденном движении газа в основном определяется условиями движения, и поэтому и для каждого вида движения расчетные формулы различны.

1. Теплопередача при вынужденном движении газа в трубах (ламинарный и турбулентный режимы).

2. Теплопередача при поперечном обтекании труб.

$$Re = \frac{IV}{\sigma}.$$

В печах присутствуют все виды теплопередачи, но преобладает, как правило, один. В печах с температурой до 600 °С конвективный вид теплопередачи, с температурой 1200 °С и выше — излучение.

Тепловое излучение — процесс передачи тепла в виде электромагнитных волн.

Нагретое тело излучает энергию, передача которой происходит с помощью электромагнитных волн длиной 0,02—400 мкм. Тепловая энергия излучается видимыми световыми лучами в диапазоне длин волн 0,4—0,8 мкм и невидимыми инфракрасными лучами в диапазоне 0,8—400 мкм.

В зависимости от агрегатного состояния нагретого тела в тепловом излучении могут участвовать либо поверхность, либо объем, если тело газообразное.

Количество тепла, излучаемого в единицу времени, называют тепловым потоком излучения Q_u .

Тепловой поток излучения, отнесенный к единице поверхности, называется поверхностной плотностью теплового потока излучения q_u , Вт/м². Тела могут поглощать, пропускать и отражать тепловые лучи. В общем случае:

$$Q = Q_{\text{п}} + Q_{\text{пр}} + Q_0,$$

$$\frac{Q_{\text{п}}}{Q} + \frac{Q_{\text{пр}}}{Q} + \frac{Q_0}{Q} = 1,$$

$$A + R + D = 1.$$

Тело, поглощающее все тепло, — абсолютно черное; тело, пропускающее все тепло, — прозрачное; тело, отражающее все тепло, — белое или зеркальное.

При поглощении лучистая энергия превращается в тепловую, вызывая нагрев тела. Поглощенные лучи снова превращаются в тепловую энергию.

$$Q_u = Q_A + Q_R + Q_D,$$

$$Q_u / Q_A = A \text{ — коэффициент поглощения.}$$

$$Q_u / Q_R = R \text{ — коэффициент отражения.}$$

$$Q_u / Q_D = D \text{ — коэффициент пропускания.}$$

Если $A = 1$, то $R = D = 0$ — вся энергия поглощается, таким свойством обладает абсолютно черное тело.

Если $R = I$, $A = D = 0$ — вся энергия отражается, тело зеркальное или абсолютно белое.

Если $D = J$, $A = R = 0$ — вся энергия пропускается, абсолютно прозрачное тело.

Представление об абсолютно черном, белом и прозрачном теле условно. Так, твердые и жидкие тела излучаемую энергию практически не пропускают, а газообразные, наоборот, плохо поглощают ее.

Соотношения между характеристиками теплопередачи устанавливаются законами теплового излучения, определяющим среди которых является закон Планка:

$$dl_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{F}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} d\lambda,$$

где h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; c — скорость света; F — площадь излучающей поверхности.

Интенсивность теплового излучения измеряется в Вт/м².

Основной закон теплового излучения является функцией температуры и длины волны:

$$I_{\lambda} = f(T, \lambda).$$

При $\lambda = 0 \rightarrow I = 0$, $\lambda = \infty \rightarrow I = 0$.

С увеличением коэффициента теплопроводности интенсивность вначале увеличивается до λ_{\max} , а затем уменьшается при λ_{∞} , $I = 0$.

Количество излучаемой энергии определяется площадью, ограниченной температурной кривой и осью длины волны.

С повышением температуры количество излучаемой энергии увеличивается, особенно в области видимой.

Плотность интегрального излучения

$$q = \frac{Q}{F}.$$

Закон смещения Вина

Любому телу свойственно тепловое излучение при условии, что его температура отлична от абсолютного нуля.

С повышением температуры максимальное излучение смещается в сторону коротких волн. Связь между λ_{\max} и T для абсолютно черного тела:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

По температуре источника в соответствии с законом Вина можно определить максимальную длину волны излучения и оценить биологический эффект его воздействия.

Закон Вина используют для измерения температуры тела. Определив в спектре излучения тела величину λ_{\max} , можно далее определить температуру T :

$$T = \frac{2896}{\lambda_{\max}}.$$

При температуре тела (твердого) до 500°C излучение происходит главным образом в области длинных волн, при температуре 1600°C до 22 % энергии приходится на коротковолновое излучение. При температурах электродуги ($6000\text{--}8000^\circ\text{C}$) коротковолновая часть спектра составляет уже более 50 %.

Тепловой поток для экрана

Рядом с излучающей поверхностью помещен экран (тонкий).

$$C_{\text{н}} = C_{\text{э}} C_{\text{о}}.$$

Найдем температуру экрана.

Тепловой поток, излучаемый на экран:

$$Q = C_{\text{о}} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{э}}}{100} \right)^4 \right] F.$$

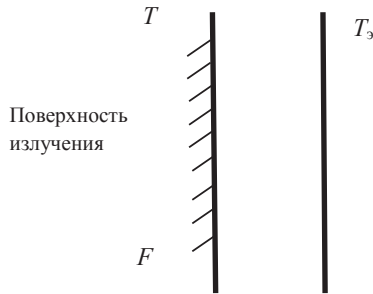


Рис. 7. Площадь излучающей поверхности и площадь экрана F

Экран будет излучать в атмосферу тепловой поток

$$Q = C_o \left(\frac{T_э}{100} \right)^4 F.$$

Приравняем эти два выражения:

$$C_o \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 \left(\frac{T_э}{100} \right)^4 \right] F = C_o \left(\frac{T_э}{100} \right)^4 F.$$

Получим

$$T_э = \sqrt[4]{\frac{1}{2}} T^4.$$

Тогда

$$Q_э = \frac{1}{2} C_o \left(\frac{T_э}{100} \right)^4 F.$$

Поскольку поверхность без экрана излучает тепловой поток Q_1 , то можно заметить лучистый тепловой поток в два раза меньше $Q = \frac{Q_1}{2}$, при n экранах поток уменьшится в $(n + 1)$ раз.

Излучение через окна и отверстия

Отверстие в тонкой стенке является моделью абсолютно черного тела, т. к. коэффициент поглощения у него равен 1 вследствие многократного отражения излучения от внутренних поверхностей. При излучении через отверстия, соизмеримые с толщиной стенки, происходит отражение и излучение от боковых стенок канала, образованного отверстием. Это учитывается коэффициентом диафрагмирования.

Тепловой поток равен

$$Q = C_o \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 F_{\text{отв}} \theta,$$

θ определяется по графикам справочной литературы, учитывающим размеры и форму отверстия.

$$Q = C_o \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] F\Phi,$$

где Φ — коэффициент диафрагмирования.

Закон Стефана — Больцмана

Интегральное значение излучения абсолютно черного тела определяется законом Стефана — Больцмана, в соответствии с которым плотность теплового потока

$$q_0 = \sigma_0 T^4,$$

где q_0 — удельная плотность теплового потока, σ_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; $[\sigma_0] = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$.

Поскольку σ_0 весьма мала, то этот закон записывают так:

$$q_0 = C_o \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;
 $[C_0] = 5,7 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$.

Поверхностная плотность теплового потока излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени температуры.

Тела, излучающие при данной температуре меньшее по сравнению с абсолютно черным телом количество энергии, называются серыми.

Для серых тел

$$q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где C — коэффициент излучения данного тела.

Коэффициент излучения серого тела всегда меньше коэффициента излучения абсолютно черного тела: $C = \varepsilon \cdot C_0$, где ε — степень черноты тела.

Закон Кирхгофа

Согласно закону Кирхгофа отношение излучательной способности q к поглотительной A для всех тел одинаково и равно излучательной способности абсолютно черного тела q_0 при той же температуре и зависит только от T :

$$\frac{q_1}{A_1} = \frac{q_2}{A_2} \dots \frac{q_0}{A_0} = q_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где q_0 — поверхностная плотность теплового потока излучения абсолютно черного тела, A_0 — коэффициент поглощения абсолютно черного тела.

Поскольку $A_0 = 1$, то

$$\frac{q_1}{A_1} = \frac{q_2}{A_2} = q_0,$$

$$q = AC_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

$$A = \varepsilon,$$

где ε — степень черноты реального тела, численно равная поглощательной способности данного тела:

$$q = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

т. е. поверхностная плотность теплового потока излучения абсолютно черного тела выше поверхностной плотности теплового потока излучения любого действительного тела.

Закон Ламберта

Закон Стефана — Больцмана позволяет рассчитать полное количество тепла, излучаемое какой-либо поверхностью во всех направлениях. Однако часто необходимо определить, какое количество излучается под тем или иным углом к излучающей поверхности или ее нормали. Такую зависимость выражает закон Ламберта, по которому

$$q_\varphi = q_n \cos \varphi = \frac{q}{\pi} \cos \varphi,$$

где q_n — плотность теплового потока по нормали, q_φ — плотность теплового потока под углом φ к нормали, φ — угол между направлением луча и нормалью в градусах.

Известно, что q_n меньше q в π раз, т. е. $q_n = \frac{q}{\pi}$.

Поверхностная плотность излучения q_n в направлении нормали N к поверхности излучения F_l представлена на рис. 8.

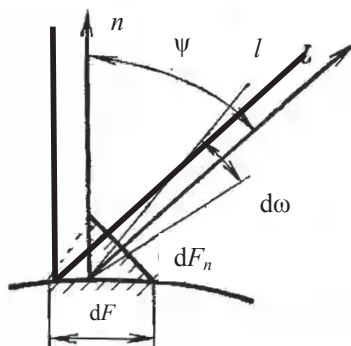


Рис. 8. Плотность лучистого потока

Закон квадратов расстояний

Плотность лучистого потока зависит от того, на каком расстоянии от источника излучения находится тепловоспринимающая поверхность. Точечный источник находится в среде, не поглощающей тепловые лучи.

Согласно закону квадратов расстояний, плотность лучистого источника потока q_l на расстоянии 1 м от точечного источника обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Среда, не поглощающая тепловые лучи, — это диатермическая среда, для которой $D = 1$, $A = R = 0$.

$$q_l = \frac{q_1}{l^2},$$

где q_l — плотность теплового потока на расстоянии 1 м от источника излучения.

Этот закон справедлив для тех случаев, когда размеры излучаемого тела малы по сравнению с расстоянием.

Для протяженного источника показатель степени уменьшается от 2 до 0, при увеличении размеров источника — возрастает от 0 до ∞ . В частности, для линейного источника этот показатель равен 1.

Излучение газов

Одно- и двухатомные газы (CO , H_2 , N_2 , O_2 и т. д.) практически не излучают лучистую энергию. Газы, имеющие в молекуле три атома и более, обладают такой способностью (CO_2 , H_2O), но лишь в определенных интервалах длин волн.

Степень черноты газов является функцией t и $p \cdot S_{\text{эф}}$, где t — температура, p — парциальное давление, $S_{\text{эф}}$ — эффективная длина лучей.

Тепловой поток излучения от газов к нагреваемому металлу

$$Q = C_{\text{ткм}} F_m \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right],$$

где $C_{\text{ткм}}$ — приведенный коэффициент излучения газов на металлы с учетом кладки; F_m — площадь газового тела.

Наличие в продуктах сгорания сажистых частиц увеличивает коэффициент излучения.

Спектр поглощения газов — селективный. Это означает, что газы поглощают тепловую энергию в определенных интервалах длин волн. Как следует из закона Кирхгофа, газы могут испускать лучи только с теми длинами волн, что и лучи, которые они поглотили. Поэтому излучение газов является также селективным.

Практически заметной поглощательной и излучательной способностями обладают газы, имеющие не менее трех атомов в молекуле. На практике наблюдается излучение CO_2 и H_2O . Их спектр носит полосчатый характер.

Воздействие излучения газов на производственный персонал происходит при наличии открытого факела. В некоторых случаях газовые слои служат экранами, поглощающими тепловое излучение.

Энергия излучения газов зависит от толщины слоя S , парциального давления p и температуры T .

Теплообмен между абсолютно черными телами

При теплообмене между двумя абсолютно черными телами, имеющими температуру T_1 и T_2 , тепловой поток равен

$$Q = C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12},$$

где F_{12} — расчетная поверхность теплообмена.

Величину F_{12} определяют с помощью углового коэффициента ϕ_{12} , который показывает, какая часть Q_{12} полусферического лучистого потока Q_1 , излучаемого телом 1, попадает на тело 2, находящееся с ним в процессе теплообмена:

$$\phi_{12} = \frac{Q_{12}}{Q_1} = \frac{F_{12}}{F_1} = \frac{1}{F} \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{\pi l^2} dF_1 dF_2.$$

Отсюда $F_{12} = \phi_{12} F_1$.

Теплообмен между серыми телами

В расчетах используют понятие приведенной степени черноты ε_n , с помощью которой учитывают несовершенство поглощения лучистой энергии серыми телами и отраженные потоки:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \phi_{1-2} F_1,$$

где ε_n — приведенная степень черноты двух тел; F_1 — площадь поверхности первого тела; ϕ — угловой коэффициент излучения первого тела на второе.

Вся энергия с одного тела падает на другое, т. е. $\phi = 1$.

При теплопередаче между двумя бесконечными параллельными пластинами $\phi = 1$ и тепловой поток

$$Q_{1-2} = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] F_1.$$

Влияние экрана сводится к ослаблению теплового потока, который можно существенно уменьшить. При меньшей степени черноты этот эффект увеличивается.

Если $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$, например в случае теплообмена между двумя параллельными бесконечными плоскостями, то

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Для серых тел с высокой степенью черноты можно принять $\varepsilon_{np} = \varepsilon_1 \varepsilon_2$.

Коэффициент теплопередачи излучением

На практике передача излучением почти всегда сопровождается только передачей конвекцией. При расчете совместной теплопередачи применяют коэффициент теплопередачи излучением

$$q_{12} = a_\lambda (t_1 - t_2).$$

Так как

$$q_{12} = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$a_\lambda = \varepsilon_n C_0 \frac{\left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}.$$

Коэффициент теплопередачи излучением a_λ зависит от оптических свойств и температуры поверхностей, участвующих в теплообмене.

Плотность суммарного теплового потока равна

$$q = q_\lambda + q_k = \alpha(t_1 - t_2) = (\alpha_\lambda + \alpha_k)(t_1 - t_2),$$

где α_λ и α_k — коэффициенты теплопередачи излучением и конвекцией.

Для конвективного теплообмена используется закон Ньютона — Рихмана:

$$Q = \alpha_k(t_n - t_b)F,$$

где t_n — температура поверхности источника тепловыделения;
 t_b — температура окружающего воздуха.

Расчет интенсивности теплового облучения

Интенсивность теплового облучения рассчитывается по уравнению

$$Q_{12} = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{12}.$$

Если излучающая поверхность F велика по сравнению с размерами тела человека, то угловой коэффициент φ приближается к 1, а интенсивность облучения перестает зависеть от расстояния между облученным телом и источником излучения. Если излучающая поверхность F мала, интенсивность облучения обратно пропорциональна расстоянию l (для линейного источника) и его квадрату l^2 (для точечного источника).

Поэтому интенсивность облучения от нагретой поверхности или через отверстие в печи рекомендуется определять по формулам:

$$Q = \frac{0,91F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - 110 \right]}{l^2}, \text{ Вт/м}^2, \text{ для } l \geq \sqrt{F},$$

$$Q = \frac{0,91F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - 110 \right]}{l}, \text{ Вт/м}^2, \text{ для } l \leq \sqrt{F},$$

$$Q = 5,7 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - A \right] \varepsilon_{\text{пр}} \varphi \cos \alpha,$$

где $A = 85$ для человека и хлопчатобумажной ткани, $A = 110$ для сукна; $\varepsilon_{\text{п}}$ и φ определяют по графикам в справочной литературе; $\cos \alpha$ — поправка на смещение с линии, перпендикулярной к центру излучающей поверхности, — косинус угла между нормалью к излучающей поверхности и направлением от центра излучающей поверхности к рабочему месту.

Если в результате взаимного перемещения источника излучения и облучаемого тела или изменения температуры излучателя и других его характеристик интенсивность облучения персонала меняется в течение смены, защитные мероприятия следует разрабатывать исходя из максимальной интенсивности облучения.

4.3. Защита оборудования от теплового излучения

Одним из способов защиты от теплового излучения является тепловая изоляция. Тепловая изоляция поверхностей излучения (печей, сосудов и трубопроводов с горячими газами и жидкостями) снижает температуру излучающей поверхности и уменьшает как общее тепловыделение, так и радиационную его часть. При этом доля лучистого тепла с понижением температуры уменьшается, благодаря чему интенсивность облучения персонала при устройстве изоляции снижается в значительно большей степени, чем общее тепловыделение.

Тепловая изоляция уменьшает тепловые потери оборудования, что, в свою очередь, обуславливает сокращение расхода топлива (электроэнергии, пара), а также затрат, связанных с работой топливоподающих и тягодутьевых устройств, и увеличение производительности агрегатов. Проведение высокотемпературных процессов без соответствующей тепловой изоляции не позволит достигнуть необходимой температуры. Таким образом, тепловая изоляция улучшает условия труда и обеспечивает экономический эффект, превосходящий стоимость сэкономленного топлива.

Однако когда ограждающие конструкции агрегата находятся в температурных условиях, близких к верхнему допустимому пределу для данного материала (своды и торцовые стены мартеновских печей, фурменные сопла доменных печей и т. п.), тепловая изоляция, повышая рабочую температуру изолируемых элементов, может резко сократить срок их службы. В таких случаях решение о типе и виде тепловой изоляции должно быть проверено расчетом рабочей температуры изолированных элементов. Если она окажется выше предельно допустимой, защита от тепловых излучений должна осуществляться другими способами (внутренняя теплоизоляция — футеровка, внутреннее экранирование и т. д.) [5, с. 81].

Расчет тепловой изоляции

В соответствии с законом Фурье поверхностная плотность одномерного теплового потока, проходящего через тело в направлении X , равна

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

где λ — коэффициент теплопроводности; $\frac{dt}{dx}$ — градиент температуры в направлении теплового потока.

Коэффициент теплопроводности металлов, в которых перенос энергии осуществляется главным образом свободными электронами, составляет 6—360 ккал/м·ч·град.

Коэффициент теплопроводности твердых диэлектриков равен 0,5—5 ккал/м·ч·град, газов — 0,005—0,17 ккал/м·ч·град.

С увеличением температуры теплопроводность газов увеличивается, а твердых тел — уменьшается.

Зависимость теплопроводности материалов от температуры на практике приближенно принимают линейной:

$$\lambda_t = \lambda_0 + bt.$$

В расчетах используют средний коэффициент теплопроводности в интервале температур на границах слоя t_1 и t_2 :

$$\lambda_{\text{ср}} = \lambda_0 + 0,5(t_1 + t_2).$$

Решение дифференциального уравнения для условий стационарного теплового потока в однослойной плоской стенке толщиной S и площадью F при температурах на ее поверхности t_1 и t_2 следующее:

$$Q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{S} F = \frac{(t_1 - t_2)}{R} F = K(t_1 - t_2)F,$$

где $K = \frac{\lambda}{S}$ — коэффициент теплопередачи, $R = \frac{S}{\lambda}$ — тепловое сопротивление стенки.

Для стенки из n слоев

$$Q = \frac{(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n R_i} F.$$

Температура t_m в стенке слоев $m-1$ и m :

$$t_m = t_1 - \frac{Q}{F} \sum_{i=1}^m R_i.$$

Сумму тепловых сопротивлений n слоев стенки можно заменить одним равновеликим сопротивлением:

$$R_3 = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Тогда эквивалентный коэффициент теплопроводности стенки

$$\lambda_3 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n R_i}.$$

Тепловой поток через однослойную цилиндрическую стенку длиной l с диаметром и температурой внутренней поверхности d_1 , t_1 и наружной d_2 , t_2 соответственно равен

$$Q = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)l}{\ln \frac{d_2}{d_1}}.$$

Для цилиндрической стенки из n слоев

$$Q = \frac{2\pi(t_1 - t_{n+1})l}{\sum_i \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}.$$

Температура t_m в стыке слоев $m - 1$ и m :

$$t_m = t_1 - \frac{Q}{2\pi l} \sum_i^m \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}.$$

На практике часто температуры поверхностей стенки неизвестны, а заданы температуры средние, разделяемые стенкой. В этих случаях для определения теплового потока решаются совместно уравнения теплопроводности и уравнения теплообмена на поверхностях стенки.

Контрольные вопросы

1. В какой области химической реакции температура оказывает наибольшее влияние на проводимый процесс?
2. Какие эндотермические процессы, осуществляемые в промышленности при высоких температурах, получили наиболее широкое распространение?
3. Как агрегатное состояние среды влияет на коэффициент диффузии?
4. Какими требованиями на практике ограничивается повышение температуры процессов?
5. Что такое теплопередача?
6. Как называется процесс передачи тепла от одних частей тела (твердого, жидкого, газообразного) к другому без заметного изменения микрочастиц друг относительно друга?
7. Что такое конвекция?
8. За счет чего осуществляется передача тепла при тепловом излучении?
9. Какие процессы происходят при использовании тепловой изоляции поверхностей излучения?

Список библиографических ссылок

1. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой ; под общ. ред. В. С. Сыромятникова. М. : Машиностроение, 1984. 528 с.
2. ГОСТ 12.0.003–2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М. : Стандартиформ, 2019. 10 с.
3. Кукин П. П., Лапин В. Л., Пономарев Н. Л. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств. Охрана труда : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 2007. 335 с.
4. Цепелев В. С., Тягунов Г. В., Фетисов И. Н. Основные сведения о БЖД : учеб. пособие. Изд. 3-е, испр. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 120 с. Ч. 1.
5. Гинберг А. М., Хохлов Б. А., Дрякина И. П. Технология важнейших отраслей промышленности : учебник. М. : Высшая школа, 1985. 496 с.

Учебное издание

Правдин Борис Александрович
Минликаева Екатерина Евгеньевна
Якшина Наталья Владимировна

**ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Редактор *Т. Е. Мерц*
Верстка *О. П. Игнатъевой*

Подписано в печать 26.10.2020. Формат 60х84/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 4,4.
Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 100 экз. Заказ 239.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

